

# Diseño e implementación del sistema de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II para el sistema SICAIPAV II

## Design and implementation of the control system on-off the laser projector Lasiris Magnum II for SICAIPAV II system

Hernán Porras Díaz\*, Duván Y. Sanabria Echeverry\*\*, Luis Enrique Rueda Duarte\*\*\* y Wilmer Daniel Ramírez Vera\*\*\*\*

### RESUMEN

Los sistemas automáticos de inspección de pavimentos utilizan la tecnología láser para el levantamiento de daños en pavimento generando imágenes en tercera dimensión de alta precisión. Sin embargo, dependiendo de la categoría del láser puede causar daños físicos a personas o animales. En Colombia, se desarrolla el sistema automático SICAIPAV II para la recolección de datos tridimensionales de vías pavimentadas que utiliza un proyector láser clase IIIB. Mantener la seguridad de los operarios y de las personas circundantes, y cumplir la normatividad colombiana de seguridad ocupacional y bienestar, son un requisito indispensable para el levantamiento en campo. En este documento se presenta el diseño y la implementación de un sistema electrónico para el control *on-off* del proyector láser del sistema automático mediante sensores de ultrasonido, un codificador y una tarjeta de desarrollo Arduino. El sistema de control se acopla en la parte posterior de un vehículo y permite apagar o encender el láser dependiendo de la velocidad del automotor o la proximidad de las personas dentro de un área aproximada de  $3 m^2$ . Finalmente, las pruebas

\* Ingeniero civil, Doctor en Ingeniería Telemática, director del grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*, [hporras@uis.edu.co](mailto:hporras@uis.edu.co)

\*\* Ingeniero de Sistemas, Magíster en Ingeniería de Sistemas e Informática, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*, [duvan.sanabria@correo.uis.edu.co](mailto:duvan.sanabria@correo.uis.edu.co)

\*\*\* Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*, [luis.rueda5@correo.uis.edu.co](mailto:luis.rueda5@correo.uis.edu.co)

\*\*\*\* Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*, [wilmer.ramirez@correo.uis.edu.co](mailto:wilmer.ramirez@correo.uis.edu.co)



experimentales demuestran la efectividad del sistema, con una cobertura del 52,9% del área de riesgo y tiempos de retardo de 1,13 S.

**Palabras clave:** Sistema de control, sensor de ultrasonido, codificador relativo, tarjeta de desarrollo Arduino.

## ABSTRACT

Automatic inspection systems use laser technology pavements for collection pavement damage generating three dimensional images of high precision. However, depending on the category of laser may cause injury to people or animals. In Colombia, the automated system SICAIPAV II is developed for collecting three dimensional data of paved roads using a class IIIB laser projector. Maintain safety of operators and bystanders, and comply with Colombian law occupational safety and welfare are an indispensable requirement surveying in the field. This paper presents the design and implementation of a control electronic system for on-off laser projector automatic system using ultrasonic sensors, an encoder and an Arduino development board. The control system is coupled on the back of a vehicle and allows turned on or off the laser depending on the vehicle speed or proximity of people within an area approximately  $3 m^2$ . Finally, experimental tests demonstrate the effectiveness of the system, with coverage of 52,9% of the area of risk and delay times 1,13 S.

**Keywords:** Control system, ultrasonic sensor, relative encoder, Arduino development board.

## I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad, la economía de los países alrededor de todo el planeta tiene una dependencia directa con las vías de comunicación, por esta razón el estado de las carreteras es de gran importancia. Para llevar un control del estado de cada una de las vías, se envían inspectores que llenan formatos a mano que implica un proceso de gran inversión en tiempo y dinero. Además, este tipo de inspecciones son subjetivas y peligrosas para la comisión de campo [1]–[3]. Con base en la necesidad de un sistema confiable, seguro y rápido nacen los sistemas de gestión de pavimentos (PMS, por su sigla en inglés), que implementan métodos de inspección automática mediante la captación de imágenes y el uso de tecnología láser que aportan información valiosa para la rehabilitación y mantenimiento de las vías [2], [4].

Los sistemas automáticos de inspección de pavimentos permiten agilizar la obtención de datos,

economizar los gastos por mano de obra y mejorar el rendimiento de los procesos de inspección. La tecnología láser se aplica en el levantamiento de daños en pavimento creando imágenes en tercera dimensión de alta precisión [2], [5]–[7]. Sin embargo, el láser dependiendo de su categoría puede causar daños físicos en personas o animales.

En Colombia se destaca la iniciativa de Porras et al. [7], [8] del sistema de captación de imágenes de pavimento usando un enfoque tridimensional denominado SICAIPAV II, que consiste en un sistema automático para la reconstrucción tridimensional de los daños en pavimento utilizando un proyector láser categoría IIIB. Mantener la seguridad de los operarios y de las personas circundantes, y cumplir a cabalidad la normatividad colombiana de seguridad ocupacional y bienestar, son un requisito indispensable para el levantamiento en campo.

Por lo anterior, la clasificación del proyector láser genera un alto riesgo para la integridad de los

transeúntes como personas o animales que estén expuestos directamente al láser [9], [10]. Sin embargo, este tipo de laser no produce una reflexión difusa peligrosa según la norma IEC 825 [9]. Por lo tanto, la ley general colombiana de seguridad ocupacional y bienestar del Artículo 315 hasta el 323, exige que se deben garantizar las condiciones adecuadas de salud, seguridad y bienestar en el trabajo para proteger a las personas y el medio ambiente, y los riesgos directos e indirectos [11]. Además, la nueva clasificación de riesgo según el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España especifica medidas de control para este tipo de aplicaciones (UNE EN 608825-1/A2: 2002) [12].

Ahora bien, el uso de sistemas de control y automatización es cada vez más frecuente en la actualidad, porque son útiles en el sector industrial y hasta en la vida cotidiana, pues optimizan y facilitan actividades que anteriormente demandaban mayor tiempo y mano de obra [13]–[15]. Dichos sistemas se usan en procesos y proyectos industriales, como la automatización de una fábrica o el control de puertas de un edificio. Estos sistemas se aplican para el control automático de dispositivos a fin de no exponer al operador. Asimismo, los sistemas electrónicos de automatización brindan seguridad y reducen costos en recurso humano, características en los procesos propios de los PMS [16].

Los sistemas de control y automatización surgen como una necesidad de las personas que buscan crear maquinaria rápida y eficiente, de acelerar su proceso de desarrollo, de simplificar el trabajo y de mejorar su estilo de vida. El desarrollo tecnológico avanza de forma rápida hasta desarrollar innovadores inventos que llegan a ser usados en diferentes industrias, con la intención de agilizar los procesos [14], [15], [17].

Los sistemas de control y automatización, que se implementan con una tecnología de alto grado de electrónica que permite representar los fenómenos físicos [18]–[21], están compuestos por un sensor o transductor usado para convertir la señal física en una señal eléctrica, que llega a un circuito eléctrico en donde es procesada por una tarjeta de desarrollo. En este caso la tarjeta usada es el Arduino uno [22], que al obtener el valor de

la señal realiza una acción previamente programada por el ingeniero o diseñador del dispositivo de control, quien ajusta el programa al objetivo que se desee cumplir de acuerdo a la señal recibida. Posteriormente, la tarjeta de desarrollo envía una señal de salida a un dispositivo denominado actuador, que se encarga de cumplir la acción determinada.

Este trabajo reporta la tercera etapa del sistema denominado SICAIPAV II [6]–[8], que consiste en un sistema de control de potencia para el proyector láser, de manera que se interrumpa la proyección cuando el vehículo supere los límites de velocidad establecidos, se encuentre estacionado o se invada un área de acción predeterminada. El sistema de control considera el área de cobertura, la velocidad de respuesta y las condiciones para la captura de datos, presentando un arreglo de sensores de ultrasonido, el procesamiento de las señales del codificador y los controladores programados mediante la tarjeta de desarrollo Arduino. Por último, en el diseño se considera que los sensores se deben ubicar con un determinado grado de orientación en la parte posterior del vehículo.

El documento está organizado de la siguiente manera: La sección II presenta una descripción de la segunda etapa del sistema SICAIPAV usando un enfoque tridimensional. En la sección III se presenta la importancia del uso de los sensores ultrasónicos. Posteriormente, una sección de generalidades donde se plantean los requerimientos del sistema. Luego, se presenta los criterios tenidos en cuenta para la selección de los dispositivos. En la sección VI, se muestra la implementación y conexión de los dispositivos del sistema. En la sección VII, se detalla el procedimiento para la configuración y calibración del sistema implementado. En la sección de resultados, se describe las pruebas experimentales para corroborar la efectividad del sistema. Finalmente, se presentan las conclusiones.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN SICAIPAV II

El sistema de captación de datos tridimensional SICAIPAV Fase II [7], está compuesto por un proyector láser Lasiris Magnum II que emite



**Figura 1.** Sistema SICAIPAV fase II

un haz de línea infrarrojo sobre la superficie del pavimento (Véase la Figura 1). La intersección entre la luz proyectada y la superficie del objeto es captada por una cámara de escaneo por área, y la reconstrucción tridimensional de los daños de pavimento se realiza mediante el hardware FPGA (de su sigla en inglés, *Field Programmable Gate Array*). Este sistema puede captar un número determinado de imágenes cuando el vehículo se desplaza.

Adicionalmente, la llanta del vehículo está conectada a un codificador rotatorio relativo que se encarga de enviar pulsos por cada revolución. El codificador alcanza 2500 pulsos por revolución - PPR y mediante señal externa (*trigger mode*) se obtura la cámara. El láser emitido por el Lasiris Magnum II tiene una potencia de 3200 mW y es potencialmente peligroso para los ojos humanos expuestos a corta distancia y sin protección. Para que el sistema sea seguro de usar en el exterior, se implementa un sistema automático de control *on-off* para el proyector láser en los siguientes escenarios: en primer lugar, cuando alguna persona salga o entre en el área de riesgo (área equivalente a  $3 \text{ m}^2$ ); en segundo lugar, se activa el apagado cuando el vehículo exceda los 50 km/h (eje de las llantas rotando hacia delante). Finalmente, cuando el vehículo retroceda a cualquier velocidad (flanco de bajada del codificador) o se detenga. En cualquiera de los casos anteriores, el sistema de control apagará el láser.

### III. APLICACIONES

En diferentes aplicaciones se requiere saber la proximidad de los objetos a ciertos lugares como robots, vehículos, entre otros. El avance

de la tecnología ha permitido crear dispositivos o sensores capaces de detectar la presencia de objetos a una determinada distancia. Estos dispositivos han sido fabricados usando diferentes métodos, el primero fue la detección de objetos mediante placas que producen un campo eléctrico generando un cambio en su interior [23]. Sin embargo, estos solo podían detectar objetos a corta distancia. Con el avance de las investigaciones, se comenzaron a desarrollar aplicaciones que eran útiles para la seguridad tanto de viviendas como de grandes fábricas [24].

Posteriormente, se comienza a manipular otras variables como la inductancia, las ondas y las ondas ultrasónicas. Según la literatura los sensores que mejor se adaptan a los trabajos industriales y exteriores son los ultrasonidos [25]–[30] basados en un dispositivo piezoeléctrico que genera un tren de ondas ultrasónicas que viajan por el medio y que, al ser reflejadas por la superficie del objetivo, son devueltas al receptor para detectar la señal. La máxima distancia de detección depende del poder de las ondas ultrasónicas, la impedancia acústica de propagación del medio, la sensibilidad del receptor y el índice de reflexión del objetivo [31].

En este proyecto el sensor utilizado usa las ondas ultrasónicas para cubrir un área de riesgo de  $3 \text{ m}^2$ . Las características de funcionamiento del sensor de ultrasonido, como su rapidez, capacidad de detección de objetos a larga distancia, su precisión y el hecho de que sus resultados no se ven afectados por la humedad, lo convierten en la herramienta más útil entre los sensores de proximidad, ya sea porque detecta un cambio o movimiento en un lugar cerrado, hasta aplicaciones de robótica como evitar obstáculos y conocer la distancia al obstáculo. También se utilizan en sistemas de mapeo móvil [28], u otras aplicaciones con sensores de proximidad [25].

Por último, los sensores ultrasónicos superan las limitaciones de los sensores inductivos, capacitivos, ópticos y otros más, debido a características como la rápida respuesta y la operación sin contacto, que ayudan a mejorar la vida útil del dispositivo independientemente del número de operaciones que realice [27]. Esta última característica es de gran importancia para los

- Diseño e implementación del sistema de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II •

sistemas de captación de datos y la inspección de pavimentos porque el sensor se utilizará constantemente para la detección de personas u obstáculos y las ondas ultrasónicas permiten una rápida respuesta para la interrupción del láser.

#### IV. GENERALIDADES DEL SISTEMA

El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un sistema automático de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II, que garantice el encendido o apagado del láser teniendo en cuenta tres escenarios: la velocidad del vehículo, su dirección de desplazamiento y la proximidad de la personas al láser. En primera lugar, la variable velocidad es importante porque al sobrepasar el rango de velocidad establecido por el sistema varía la precisión del modelo tridimensional reconstruido. En segundo lugar, el sentido de la dirección de desplazamiento del vehículo es necesario para conocer previamente si se está retrocediendo.

Por último, la variable proximidad de las personas al láser es una medida de seguridad, debido a que la alta potencia del láser ocasiona lesiones en los ojos, puesto que, aunque el proyector este apuntando al piso, el haz que cae hace una reflexión difusa por la superficie debido a su rugosidad, que se refleja en todas las direcciones y alguno de esos rayos reflejados apunten a los ojos de las personas que estén cerca.

Se establecieron unos requerimientos a partir de las investigaciones anteriores para establecer las condiciones que debe cumplir el sistema de apagado del láser. A continuación se presentan los requerimientos del sistema:

Láser apagado cuando:

- La Velocidad del vehículo es igual a 0 km/h
- La velocidad del automotor es mayor que 50 km/h
- El vehículo está retrocediendo
- Se detecta una persona en un área de cobertura de  $3\text{ m}^2$  como se muestra en la Figura 2
- Tener un interruptor de seguridad para apagado manual

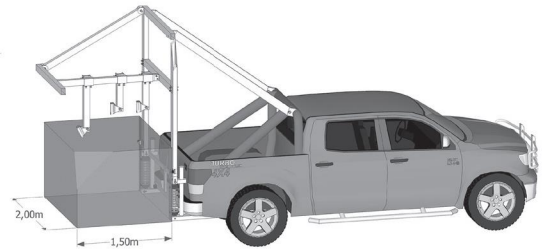


Figura 2. Área de cobertura del sistema de control.

#### V. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Los dispositivos se seleccionan con base en los requerimientos descritos anteriormente. A continuación, se detallan las características tenidas en cuenta en el proceso de selección de cada equipo.

##### A. Sensores

Actualmente, para determinar la proximidad de algún objeto, existen diferentes tipos de sensores en el mercado, como los capacitivos, inductivos, fotovoltaicos, ultrasónicos, infrarrojos y ópticos, entre otros. [31], [32]. Cada uno puede detectar objetos con características especiales u objetos en general, pero, como se necesita determinar la cercanía de personas, se descartan los capacitivos y los inductivos, debido a que estos detectan objetos metálicos y son usados para distancias pequeñas; por su parte, los sensores infrarrojos son muy sensibles al sol, por lo tanto son poco usados para exteriores y los fotovoltaicos pueden ser adulterados por situaciones incontrolables del ambiente [31]. Por el contrario, los sensores de ultrasonido carecen de dichas fallas y no se ven afectados por el sol, la lluvia u otras condiciones ambientales que puedan llegar a adulterar su medida [31]. Además, poseen rapidez en la detección de objetivos y precisión. Debido a estas características, estos sensores son los más adecuados para ser usados en este proyecto. Se busca en el mercado los sensores disponibles y se revisa sus características para obtener la cobertura total del área de riesgo con el menor número de sensores ultrasónicos. La Tabla I muestra los sensores disponibles.

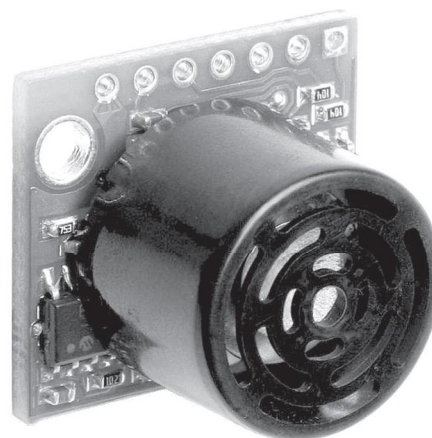
**Tabla I.** Especificaciones de sensores de ultrasonido

Referencia	Campo de medida	f de lectura Hz	Salida	Precio \$
MB7367 Sensor Ultrasonido industrial alta resolución 1mm	30 cm - 5 m	7,5	Analógica o serial	380.000
Sensor ultrasónico EZ0	0 cm - 6 m	42 k	PWM, analógica o serial	69.500
AE3 Sensor Ultrasonido resolución 1cm XL MB1330	20 cm - 7,65 m	10	PWM, analógica o serial	86.500
EZ4 Alta Resolución 1mm Sensor Ultrasonido MB1043	30 cm - 5 m	42 k	PWM, analógica o serial	81.000
Sensor ultrasónico SRF05	1,7 cm - 4 m	40 k	Bus	64.000
Sensor ultrasónico SRF08	3 cm - 6 m	40 k	Standard I2C Bus	118.500
Sensor ultrasónico SRF01	16 cm - 6 m 0 cm - 6 m (con calibración)	40 k	Bus serial de un solo pin a 9600 Bps	85.000

Con base en la Tabla I, el sensor ultrasónico EZ0 que se muestra en la Figura 3 fue seleccionado porque, el valor mínimo del campo de medida es de 0 cm. También, porque tiene la mayor frecuencia de lectura con un valor de 42 kHz. Además, este sensor tiene una salida analógica que se necesita para el controlador. Finalmente, con base en el estudio de mercado este sensor es uno de los que presenta el menor precio.

## B. Tarjeta de desarrollo Arduino

Arduino es actualmente una de las plataformas virtuales de mayor aplicación gracias a su fácil manejo e implementación en el desarrollo de sistemas electrónicos debido a que es un sistema de hardware y software libre, equipado con un microcontrolador que puede ser programado al gusto del programador. La tarjeta de desarrollo cuenta con gran cantidad de librerías que logran poner en funcionamiento el Arduino junto con diversos dispositivos electrónicos como sensores y motores, creando sistemas aplicables a ramas como la Robótica, donde se pueden realizar implementaciones exitosas en máquinas programadas para cumplir una o más funciones específicas [34], [35]. Actualmente la tarjeta de desarrollo se utiliza en campos innovadores como la automatización de procesos y los sistemas domóticos, siendo un componente

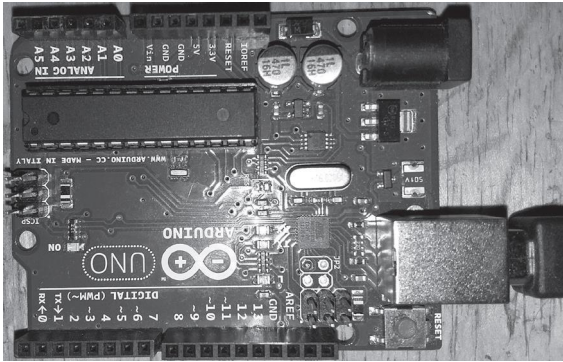


**Figura 3.** Sensor de ultrasonido EZ0, [33].

de bajo costo y de programación de alto nivel [36].

En el mercado se encuentran diversas versiones de la tarjeta de desarrollo Arduino [37], cada una cuenta con especificaciones diferentes, logrando una variedad de tarjetas para diversas aplicaciones. Existen tarjetas básicas para el aprendizaje y tarjetas especializadas como las tarjetas de conexión inalámbrica o las tarjetas con múltiples periféricos de entrada y salida. Para cumplir los requerimientos del sistema se tiene en cuenta el tiempo de reloj ofrecido por cada tarjeta.

- Diseño e implementación del sistema de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II •



**Figura 4.** Tarjeta de desarrollo Arduino

El Arduino Uno ofrece una velocidad de reloj de 16 MHz, en las entradas hay cuatro señales de 42 kHz y otra de 3 kHz, que permite trabajar las señales de entrada que generan los sensores y el codificador sin perder información. En la Figura 4 se muestra la tarjeta de desarrollo Arduino.

## VI. IMPLEMENTACIÓN

El sistema de control está compuesto por los siguientes dispositivos:

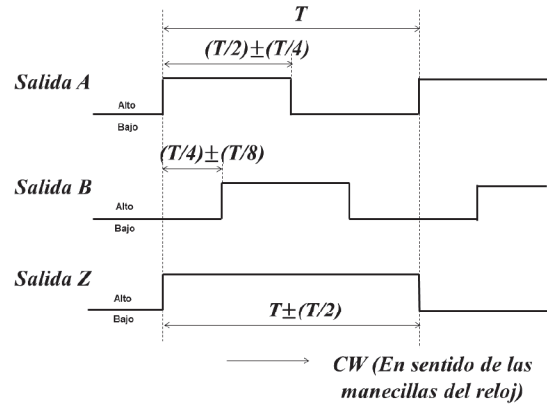
- Sensores de ultrasonido
- Codificador rotatorio relativo
- Microcontroladores

El siguiente paso después de la selección de los dispositivos, es realizar la implementación del sistema y la conexión final de los dispositivos. En las siguientes subsecciones se detalla las especificaciones técnicas tenidas en cuenta para la integración de los dispositivos.

### A. Señal del codificador relativo

El codificador relativo de referencia E50S82500-3-T-24 envía las señales en forma de tren de pulsos de las entradas A, B y Z como se ilustra en la Fig. 5 a un divisor de frecuencia de módulo 10 y las señales de salida del divisor son enviadas a la tarjeta de desarrollo, que compara el desfase de las señales A y B con referencia a Z y calcula la velocidad a la que se moviliza el vehículo.

El codificador relativo tiene una frecuencia máxima de respuesta de 180 [kHz] y una resolución de



**Figura 5.** Salida de ondas del codificador [38]

2500 pulsaciones por revolución [38], entonces, según (1) se calcula las máximas pulsaciones por segundo (PPS).

$$M_{rpm} = \frac{f_{max}}{S} * 60 \quad (1)$$

Donde  $M_{rpm}$  son las máximas revoluciones por minuto,  $f_{max}$  es la frecuencia máxima de respuesta del sensor y  $S$  es la sensibilidad del codificador.

Según la ecuación (1), para una frecuencia máxima de respuesta de 180.000 Hz y una sensibilidad de 2500 pulsos por revolución (PPR) se tiene una máxima revolución por minuto de 4320.

Ahora bien, para determinar la cantidad indicada de pulsos por revolución, se tiene en cuenta que la llanta del vehículo tiene un diámetro aproximado de 75 cm, es decir, que recorre 235,62 cm en una revolución, al recorrer 50 km/h equivalente a 13,89 m/s se obtienen 5,90 revoluciones por segundo, es decir, 14.750 PPS que es el número máximo de pulsaciones por segundo para mantener encendido el láser.

Para evitar un desbordamiento en la tarjeta Arduino, se usa el divisor de frecuencia para reducir 10 veces la cantidad de pulsos por revolución del codificador, obteniendo un valor de 250 PPR. Ahora, teniendo en cuenta los pulsos de salida del divisor, mediante la siguiente expresión se determina la sensibilidad del sistema:

$$S = \frac{2\pi * \left(\frac{d}{2}\right)}{psd} \quad (2)$$

Donde  $S$  es la sensibilidad del sistema,  $d$  es el diámetro de la llanta del vehículo y  $psd$  son los pulsos de salida del divisor. Por lo tanto, con base en (2), con un diámetro aproximado de 75 cm y pulsos de salida del divisor de 250, se tiene una sensibilidad de 9,4 mm, que se refiere al valor mínimo para apreciar un cambio medible [39].

## B. Señal de los sensores de ultrasonido

Los sensores ultrasonido emiten de forma cíclica un pulso acústico de corta duración y de alta frecuencia que se propaga a la velocidad del sonido por medio del aire. Al encontrar un objeto, el pulso es reflejado y regresa hacia el sensor que internamente calcula la distancia basándose en el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso y la recepción de la señal reflejada. La respuesta analógica del sensor se da por medio de una señal de voltaje que tiene una amplitud directamente proporcional al tiempo mencionado [40].

## C. Tarjeta de desarrollo Arduino

La tarjeta de desarrollo recibe las señales de los sensores y del codificador relativo, por medio de las entradas analógicas y digitales, respectivamente. Con base en las señales, Arduino enciende o apaga el láser por medio de una señal de control que se envía al circuito para conmutar el estado del proyector.

El proceso interno de la tarjeta tiene como prioridad la información suministrada por el sensor, de modo que cuando este se encuentre detectando personas en el área de riesgo el láser no podrá ser encendido y, por el contrario, si los sensores no detectan nada, la segunda prioridad será el interruptor manual para que en caso de que el sistema de apagado automático falle, el conductor tenga la posibilidad de apagar manualmente el láser. Como tercera opción está la información del codificador relativo, del que se obtiene la dirección de movimiento del vehículo y sus pulsaciones por segundo. Cuando el codificador indique que el vehículo está retrocediendo el láser será apagado, de lo contrario se revisa las PPS, y si estas sobrepasan las 23600 PPS o se tiene una lectura de 0 PPS durante veinte segundos, el láser se apagará. En la Figura 6 se indica el *pseudocódigo* de la programación de la tarjeta.

```

Si (interruptor del sistema de control == on)
{
    velocidad = se calcula con los pulsos del codificador
    distancia = se calcula con los datos de los sensores
    reversa = desfase entre las fases A y B del codificador

    Si (velocidad > 50 [km/h] o distancia < 1,5 [m] o reversa == on)
    {
        laser = apagado
        led = encendida

        Mientras (tiempo 5 [s])
        {
            bocina = encendida
        }
    }
    Si no
    {
        laser = encendido
        bocina = apagada
        led = apagado
    }
}
    
```

Figura 6. *Pseudocódigo*

## D. Conexión final

La tarjeta de desarrollo y los sensores necesitan una alimentación de 5 V. La cigarrera del vehículo provee una tensión de 12 V DC, por lo que se implementa un circuito para regular la tensión y mantener estable los 5 V en los terminales de alimentación de los dispositivos.

Por otra parte, la Figura 7 muestra el esquema general del sistema, en que las salidas A y B del codificador tienen un valor entre 0 a 10V que son acondicionadas por medio de un circuito para que estén en los rangos de operación del divisor y el *flip-flop*. Al circuito se le agrega un interruptor para que sea activado manualmente por el operador en caso de emergencia. También se cuenta con el interruptor de apagado del láser. Como indicadores finales el sistema de control tiene una luz y una bocina. Cuando el controlador ordena apagar el láser un LED se enciende y la bocina suena durante 2 s.

## VII. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

A continuación se describe el proceso realizado para la configuración y calibración del sistema de control, donde se realizaron pruebas experimentales para comparar los resultados de los valores obtenidos de distancia y velocidad calculados por la tarjeta de desarrollo Arduino, y los resultados reales.



- Diseño e implementación del sistema de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II •

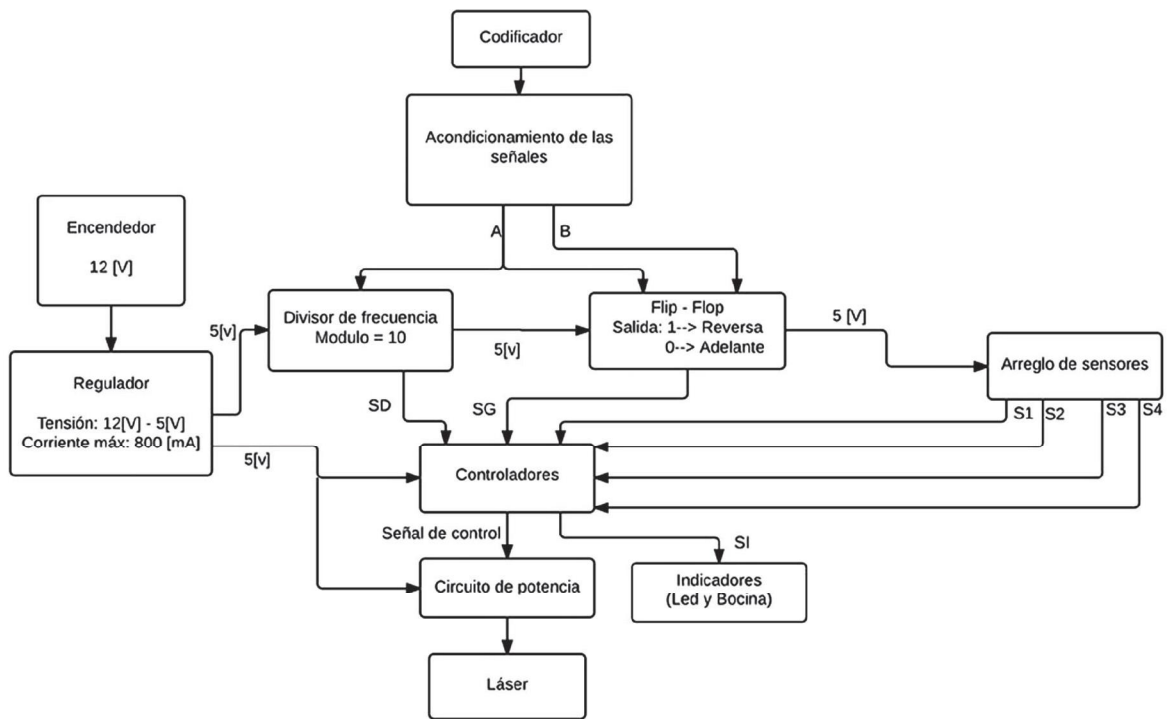


Figura 7. Esquema del sistema

### A. Sistema de proximidad

El sistema de control on-off del proyector laser Lasiris Magnum II, cuenta con cuatro sensores ultrasónicos MB1000 LV-MaxSonar EZO, ubicados de tal forma que se logre una mayor área de cobertura.

Para establecer las posiciones de los sensores, se modela la proyección cónica de cada sensor mediante el programa AUTOCAD, se calcula el área total cubierta en cada vista y el área cubierta por la proyección de la onda de los sensores en la vista superior como se muestra en la Figura 8. Finalmente, se compara los resultados de cada escenario de posiciones y se selecciona la de mayor área de cobertura.

En la Figura 9 se ilustra el diseño del montaje de los sensores en el vehículo del sistema SICAIPAV para el control de la proyección láser mediante proximidad.

Para implementar los 4 sensores en el sistema de detección se debe tener en cuenta que al poner en funcionamiento más de un sensor ultrasóni-

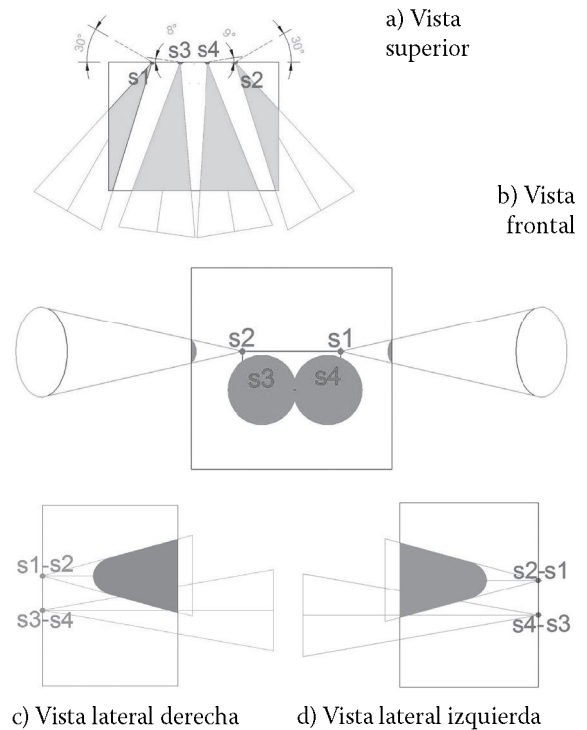
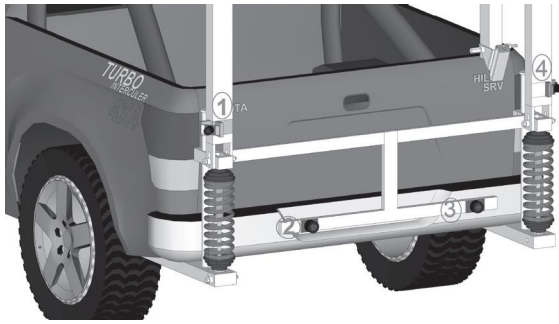


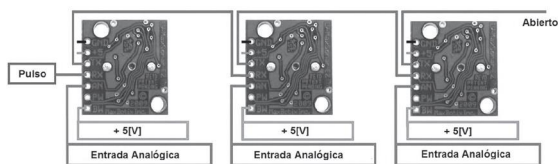
Figura 8. Proyección del campo de cobertura del sensor en cada vista



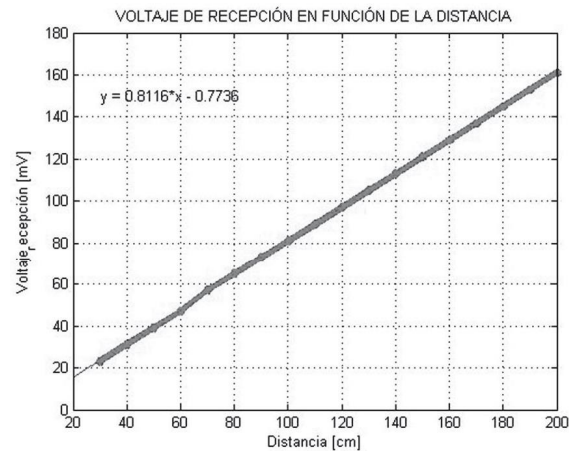
**Figura 9.** Localización de los sensores en la camioneta

do, las ondas de un sensor pueden hacer interferencia con las ondas de los demás sensores, provocando datos erróneos en la lectura de la tarjeta Arduino. Para resolver este problema, los sensores LV-MaxSonar tienen una configuración para poner en funcionamiento más de un sensor ultrasonido a la vez, esta se denomina sistema en cadena de sensores. Esta configuración utiliza los pines de transmisión y recepción de datos seriales, de tal forma que los sensores trabajan en diferentes periodos de tiempo evitando que exista alguna interferencia entre ellos. En la Figura 10 se puede observar dicha configuración.

Para poner en funcionamiento la cadena de sensores se debe estar aplicando al sistema un pulso que tenga un ancho entre  $20 \mu s$  a  $48 ms$  [40], este pulso se aplicara al pin de recepción del primer sensor en la cadena. Para evitar por completo la interferencia entre sensores se selecciona una frecuencia adecuada para el pulso de activación, la frecuencia de operación del sensor ultrasónico es de  $42 kHz$ , equivalente a  $23,8 \mu s$  de periodo de operación. El periodo del pulso de activación es seleccionado con un valor de  $200 \mu s$  para que haya tiempo suficiente para operar todos los sensores del sistema.



**Figura 10.** Conexión de sensores en cadena



**Figura 11.** Gráfica del voltaje de recepción contra distancia

Para la calibración de los sensores se realizaron pruebas de distancia desde  $10 cm$  hasta  $2,5 metros$ , se toman puntos cada  $10 cm$  y se toma el voltaje arrojado por el sensor, posteriormente se realiza el análisis del comportamiento de las dos variables y se procede a obtener la expresión matemática que expresa el voltaje dado por el sensor en función de la distancia de detección. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 11.

Despejando la ecuación que se muestra en la Figura 11 se obtiene la siguiente expresión para el cálculo de la distancia:

$$D = 1,232 * v_{in} + 0,953 \quad (3)$$

Donde  $D$  es la distancia,  $v_{in}$  es el voltaje enviado por el sensor en  $mV$ .

## B. Velocidad

Para la calibración de la medición de velocidad se acopla el codificador relativo al eje del motor, luego el motor se ajusta a una velocidad constante, seguidamente se mide la frecuencia de la salida del odómetro y la velocidad del eje del motor, para finalmente comparar la velocidad calculada por el Arduino y la del motor. El cálculo de la velocidad de obtiene según la ecuación (4), de esta manera se verifica la exactitud de la medición.

- Diseño e implementación del sistema de control on-off del proyector láser Lasiris Magnum II •

$$V = \frac{3600\pi D \text{mod}}{PO * T * 1 \times 10^5} \quad (4)$$

## VIII. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas experimentales para corroborar la efectividad el sistema de control implementado. Para la prueba del sistema se hace el montaje completo en el laboratorio, con la posición de los sensores seleccionada de acuerdo a las pruebas de mayor área de cobertura y se realizan los siguientes escenarios:

### A. Velocidades

#### 1) Cambios de velocidad

En este escenario se mide la frecuencia de la Fase A por medio de un osciloscopio y la velocidad calculada por el Arduino mediante el monitor serial, con las medidas se obtiene la relación de Error contra Velocidad como se indica en la Figura 12. De los datos obtenidos en el intervalo de velocidades de 0 a 50 km/h, se obtiene un error máximo del 0,86 % y un error promedio de 0,52 %. Esto significa que el sistema de control presenta un comportamiento estable a cambios de velocidad.

#### 2) Lectura de velocidades constantes

Para esto se lleva a cabo 5 velocidades fijas en el rango de 0 a 50 km/h en la que se obtiene una desviación promedio de 0,54 y un error promedio de 0,14 %, corroborando la precisión del sistema.

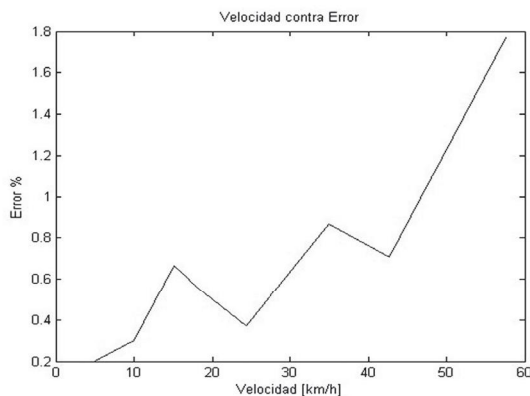


Figura 12. Gráfica de velocidad contra error

### B. Detección de objetos en el área de riesgo

Se toman 7 posiciones de entrada estratégicas como se muestra en la Figura 13. Se realizan pruebas de repetitividad ingresando un objeto con una frecuencia de 1 vez por cada 10 segundos, y separándolo en dos tipos de pruebas. En las posiciones 1, 2 y 3 se realiza una prueba de frontera y una prueba de profundidad, y en las posiciones 4, 5, 6 y 7 se realizan pruebas de frontera. Las pruebas de frontera consisten en el ingreso de un objeto hasta el límite del área calculada y la prueba de profundidad consiste en ingresar el objeto 30 cm en el área de cobertura. Estas pruebas se realizaron 10 veces en cada posición. En los límites del área se ubicaron un emisor y un receptor infrarrojo, para detectar el momento en que el objeto entra en el área, mediante el programa Matlab se grafican en tiempo real las interrupciones del emisor-receptor y la interrupción del láser.

De las pruebas de repetitividad se obtiene un tiempo de retardo máximo de 1,98 s, y un tiempo promedio de retardo de 1,13 s. Lo anterior corrobora la velocidad de respuesta del sistema

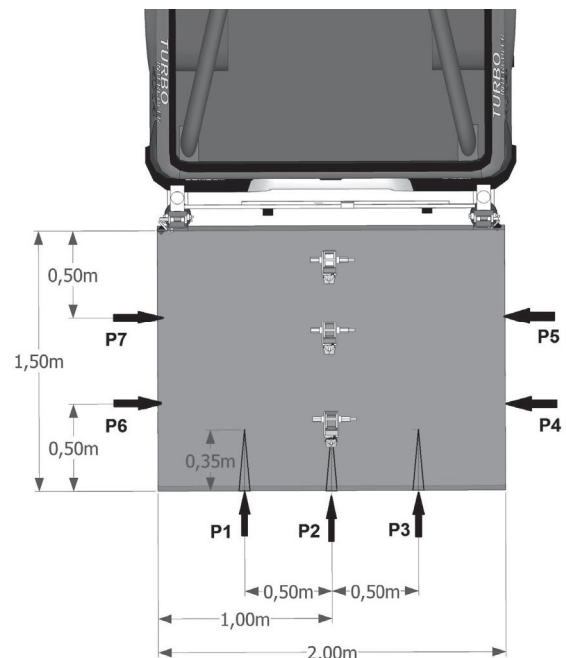


Figura 13. Posiciones para las pruebas de proximidad

de control y el cumplimiento de la especificación UNE EN 608825-1/A2: 2002. En las pruebas de frontera se obtiene un tiempo de retardo promedio de 1,13 s y un máximo de 1,98 s, y en las pruebas de profundidad un tiempo de retardo promedio de 1,14 con un tiempo máximo de 1,96 s.

## IX. TRABAJO FUTURO

El proyecto a futuro consiste en aumentar la rapidez y el área de cobertura del sistema. En primer lugar, para mejorar la rapidez del sistema, se utilizará un microcontrolador con mayor rendimiento considerando una velocidad superior de procesamiento, para lograr tiempos de respuesta más cortos ante las señales de los sensores y el codificador, por parte del sistema de control. Además, usar sensores de ultrasonido robustos y con mayor tiempo de respuesta. Por último, para aumentar el área de cobertura del sistema se tiene en cuenta la cantidad de periféricos de entrada del microcontrolador que pueden ser utilizados como conversores analógico-digital, para permitir la implementación de un mayor número de sensores en el sistema.

## X. CONCLUSIONES

La seguridad de las personas, los animales y el medio ambiente es un criterio indispensable en la inspección vial, por esta razón se implementa un sistema automático de control efectivo y eficiente para el apagado y encendido del proyector láser.

El sistema de control implementado disminuye el consumo de energía mediante la desactivación automática permitiendo extender la vida útil del láser.

El sistema de control mejora la seguridad durante el levantamiento en campo y evita la obtención de datos a velocidades superiores a la tolerada por la cámara, con el fin de conservar la precisión de los modelos tridimensionales.

Se recomienda la implementación con más de 4 sensores en el sistema de proximidad para lograr una mayor área de cobertura de la zona de riesgo.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. Los autores agradecemos especialmente al ingeniero Raúl Hernando Cadena Contreras y al Profesor Jorge Hernando Ramón Suárez (Q.E.P.D) por el soporte técnico y las directrices para el desarrollo del sistema de control.

## REFERENCIAS

- [1] Timm, David and McQueen, Jason. *A Study of Manual vs. Automated Pavement Condition Surveys*. Alabama, 2004, 141 páginas. *Technical Report*. Auburn University. Department of Transportation.
- [2] Gunaratne, M., Amarasiri, S., and Nasser, S. *Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems*. Tampa, Florida, 2008, 93 páginas. *Final Report*. University of South Florida. Department of Civil and Environmental Engineering.
- [3] Yu, X. and Salari, E. *Pavement Pothole Detection and Severity Measurement Using Laser Imaging*. En: Conferencia. 2005. *Electro/Information Technology (EIT), IEEE International Conference on*. 5 páginas.
- [4] Wang, Kelvin. *Designs and Implementations of Automated Systems for Pavement Surface Distress Survey*. *Journal Infrastructure Systems*, Volúmen 6, No 1, p. 24–32. ASCE: Transportation & Development Institute, 2000.
- [5] Transportation Research Board. *Automated Pavement Distress Collection Techniques*. Volúmen 334. Washington, D.C: Transportation Research Board National Research, 2004.
- [6] Porras, Hernán, Ramón, Jorge, Mejía, Yuri y Parra, Javier. Sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Volúmen 23, No. 2, p. 79–98. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [7] Porras, Hernán, Ramón, Jorge y Sanabria, Duvan. Diseño e implementación de un sistema automático para la recolección de datos sobre daños en pavimento, usando un enfoque tridimensional. *Revista Asfaltos y Pavimentos*, Volúmen 28, No. 5, p. 54-70. Piedecuesta: Corporación para la investigación y desarrollo de asfaltos en el sector transporte e industrial, 2014.

- [8] Porras, Hernán, Sanabria, Duvan y Mejía, Yuri. Sistema automático para la adquisición de imágenes de vías pavimentadas. *Revista Gerencia Tecnológica e Informática*, Volúmen 12, No. 32, p. 61–78. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [9] Ministerio de trabajo y asuntos sociales. NTP 261: Láseres: riesgos en su utilización (En línea). (España), 1991. (Citado: 01 de Febrero de 2015). [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp\\_261.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_261.pdf).
- [10] Universidad Politécnica de Valencia. Láser: clases, riesgos, medidas de control (En línea). (España). (Citado: 01 de Febrero de 2015). [http://www.sprl.upv.es/IOP\\_RF\\_01%28a%29.htm](http://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm)
- [11] Organización Iberoamericana de Seguridad Social. Ley de higiene y seguridad ocupacional (En línea). 1979. (Citado: 01 de Febrero de 2015). <http://www.oiss.org/estrategia/Ley-16998-Ley-General-de-Higiene-y.html>
- [12] Ministerio de trabajo y asuntos sociales de España. Láseres: nueva clasificación del riesgo (UNE EN 60825 - 1/A2: 2002) (En línea). (España), 2002. (Citado: 01 de Febrero de 2015). [http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo\\_imagenes/grupo.cmd?path=1031557](http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1031557)
- [13] Sreejeth, Mini, Singh, Madgusudan, Kumar, Parmod, Varshney, Prakhar y Sachdeva, Priyanca. *Implementation of Supervisory Control System for PMSM Drive*. En: Conferencia. 2012. *5th India International Conferencenal*. pp. 1–6.
- [14] Moreira, Antonio, Fonseca, Jaime y Tavares, Adriano. *WINCE-Based Embedded System For Control Of An Industrial Screw Machine*. En: Conferencia. 2009. *Proceedings Industrial Electronics Conference (IECON)*. pp. 2886–2891.
- [15] Ogawa, Masao. y Henmi, Yutaka. *Recent Developments on Pc+Plc Based Control Systems for Beer Brewery Process Automation Applications*. En: Conferencia. 2006. *International Joint Conference (SICE-ICASE)*. pp. 1053–1056.
- [16] Flintsch, Gerardo y McGhee, Kevin. *Quality Management of Pavement Condition Data Collection. A Synthesis of Highway Practice*. Volúmen 401. Washington D.C: *Transportation Research Board*, 2009. 134 páginas.
- [17] Gámez, Javier, Gómez, Juan, Sánchez, Alejandro y Satorres, Silvia. *Fuzzy Controller for the High-Accuracy Automatic Assembly of Vehicle Headlamps*. En: Conferencia. 2010. *Fuzzy Systems (FUZZ) - IEEE International Conference*. pp. 1–8.
- [18] Araya, A., Sekiya, K., y Shindo, Y. *Laser-Interferometric Broadband Seismometer for Ocean Borehole Observations*. En: Conferencia. April, 2007. *International Symposium on Underwater Technology, UT 2007 - International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. pp. 245–248.
- [19] Bookbinder, R., Hubbard, A., McDonald, W. y Pomeroy, P. *Design of an Ocean Bottom Seismometer with Response from 25 Hz to 100 Seconds*. *Strategic Management Journal*. Volúmen 165, p. 510–515, 2003.
- [20] Najafabadi, Farshid, Zahedi, Edmond y Ali, Mohd. A Novel Model for Abdominal Electrocardiography of a Pregnant Woman. En: Conferencia. 2005. *Asian Conference on Sensors and the International Conference on New Techniques in Pharmaceutical and Biomedical Research - Proceedings*. pp. 64–68.
- [21] Wick, Carson, Su, Jin-Jyh, Brand, Oliver, McClellan, James, Bhatti, Pamela y Tridandapani, Srin. *A Trimodal System for the Acquisition of Synchronous Echocardiography, Electrocardiography and Seismocardiography Data*. En: Conferencia. 2011. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS)*. pp. 6911–6914.
- [22] Arduino. *Arduino Board One* (En línea). 2015. (Citado: 01 de Enero de 2015). <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [23] Maloney, Timothy. *Electronica Industrial Moderna*, 5° Edición. México: Pearson Educacion, 2006. 1000 páginas.
- [24] Elshafiey, Tarief. Design and Implementation of a Museum and Banks Security System using Antenna as IR Proximity Sensor and PSoC Technology. En: Conferencia. 2011. *Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWT)*. Langkawi, Malasya. pp. 156–161.
- [25] Sabatini, Angelo, Genovese, Vincenzo, Guglielmelli, Eugenio, Mantuano, Anselmo, Ratti, Giovannino y Dario, Paolo. *A Low-Cost, Composite Sensor Array Combining Ultrasonic and Infrared Proximity Sensors*. En: Conferencia. 1995. *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 120–126.
- [26] Batarseh, David, Burcham, Tomothy y McFadyen, Gary. An Ultrasonic Ranging System for the Blind. En: Conferencia. 1997. *Proceedings of the 1997 16 Southern Biomedical Engineering*. Mississipi. pp. 1–3.
- [27] Canali, Claudio, Cicco, Giorgio, Morten, Bruno, Prudenziati, Maria y Taroni, Andrea. *A Temperature Compensated Ultrasonic Sensor Operating in Air for*

- Distance and Proximity Measurements. IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Volúmen IE-29, No. 4. p. 336-341. 1982.
- [28] Gourley, Chris y Trivedi, Mohan. *Sensor Based Obstacle Avoidance and Mapping for Fast Mobile Robots*. En: Conferencia. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Knoxville. pp. 1306–1311.
- [29] Martins, David, Dasilva, Mortala, Pruehsner, William y Enderle, Jhon. *Bump Around Automated Bumper Car*. En: Conferencia. *Proceedings of the IEEE 27th Annual Northeast Bioengineering Conference*. pp. 91–92.
- [30] Min, Se, Kim, Jim, Shin, Hang, Yun, Yong, Lee, Chung y Lee, Myoung. *Noncontact Respiration Rate Measurement System Using an Ultrasonic Proximity Sensor*, *IEEE Sensor Journal*, Volúmen 10, No. 11, p. 1732–1739, 2010.
- [31] Areny, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. 4ª Edición. Marcombo. 2003. 494 páginas.
- [32] Acevedo, Jorge y Vilas, José. *Sensores multimedia para la enseñanza de los sensores de proximidad* (En línea). (Citado: 01 de Enero de 2015). [http://www.dte.uvigo.es/recursos/proximidad/Sensores\\_Proximidad.swf](http://www.dte.uvigo.es/recursos/proximidad/Sensores_Proximidad.swf)
- [33] Dynamo. *Sensor ultrasonico EZ0* (En línea). (Bucaramanga, Colombia) (Citado: 01 DE Enero de 2015). [http://www.dynamoelectronics.com/index.php?option=com\\_virtuemart&page=shop.product\\_details&flypage=dynamo.tpl&category\\_id=78&product\\_id=987&Itemid=58](http://www.dynamoelectronics.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.product_details&flypage=dynamo.tpl&category_id=78&product_id=987&Itemid=58)
- [34] Candelas, F., García, G., Pomares, J., Jara, C., Delgado, A., Mateo, C. Mira, D. y Pérez, J. *Experiencias sobre el uso de la plataforma Arduino en prácticas de automatización y robótica*. Alicante, (No publicado) 16 páginas. Reporte. Universidad de Alicante. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
- [35] Bailón, Carlos y Díaz, Antonio. *Proyecto Prácticas Procesadores Integrados: Self-Balancing Robot basado en Arduino*. *Revista Enseñanza y Aprendizaje de Ingeniería de Computadores*. No. 5. 2015. pp. 159–166.
- [36] Arlanzón, David. *Introducción de la plataforma open source Arduino para aplicaciones de domótica y automatización en el CFGS sistemas electrotécnicos y automatizados*. 2012. 43 páginas. Trabajo de grado (Maestría). Masters Universitaris.
- [37] Arduino. *Arduino USB* (En línea). (Citado: 01 de Febrero de 2015). <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/Boards>
- [38] *Autonics Corporation. E50S8 Incremental Rotary Encoder* (En línea). (Korea). (Citado: 01 de Febrero de 2015). [http://www.autonics.com/products/products\\_detail.php?catecode=01/06/01&db\\_uid=59](http://www.autonics.com/products/products_detail.php?catecode=01/06/01&db_uid=59)
- [39] Solé, Antonio. *Instrumentación industrial*. Octava Edición. Barcelona, España. AlfaOmega, Marcombo, 2010. 792 páginas.
- [40] MaxBotix Inc. *LV - MaxSonar® - EZ™ Series* (En línea). 2012. (Citado: 01 de Febrero de 2015). [http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ\\_Datasheet.pdf](http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf)